2 Schemi a blocchi

2.1 Introduzione

Un sistema di controllo è costituito da più componenti collegati in modo da poter svolgere un determinato compito e una determinata funzione. Questi componenti possono essere di natura diversa tra loro: vi sono componenti elettrici, idraulici, pneumatici o meccanici. La teoria del controllo non si occupa della natura fisica di ogni singolo componente, né del tipo di scambio energetico che può aver luogo all'interno del sistema; una volta che il componente (sia esso un sistema oppure un sottosistema) è ridotto a un modello matematico, può venire rappresentato mediante una *scatola nera* (il *blocco*), con la caratteristica operativa descritta da una funzione matematica. Quando tale procedura è ripetuta per tutti i componenti e le parti di un sistema, quest'ultimo viene ridotto a un insieme di blocchi interconnessi, i quali possono essere combinati in un unico blocco con una rappresentazione matematica combinazione di tutti i modelli parziali. La descrizione matematica complessiva contiene tutte le informazioni necessarie a descrivere le prestazioni del sistema di controllo originale. La procedura descritta semplifica enormemente i processi di analisi e sintesi, per i quali è fondamentale conoscere il flusso del segnale tra i componenti. Gli schemi, o diagrammi, a blocchi sono anche molto utili perché si prestano in maniera naturale a simulazioni mediante amplificatori operazionali e calcolatori digitali.

In questo capitolo viene descritto il processo di trasformazione di un diagramma grafico in uno a blocchi, e le tecniche di riduzione di uno schema a blocchi complesso. È inoltre descritto l'uso di amplificatori operazionali per la simulazione di sistemi di controllo.

2.2 Definizione di schema a blocchi

In un diagramma a blocchi ogni componente (o sottosistema) è rappresentato da un blocco rettangolare contenente, nel caso di sistemi SISO, un ingresso e un'uscita scalari. Tutti i blocchi sono interconnessi da frecce che rappresentano la direzione di flusso del segnale

(inteso naturalmente in senso lato). L'operazione di un blocco, ossia di un componente, è descritta matematicamente all'interno del blocco stesso, come mostrato in Figura 2.1.

Figura 2.1 Rappresentazione di un blocco.

Esempio 2.1

Un amplificatore operazionale ha un guadagno in volt pari a 10. In Figura 2.2 è mostrata la rappresentazione a blocchi dell'amplificatore.

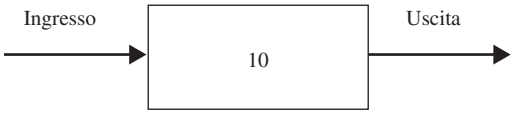


Figura 2.2 Esempio 2.1.

Un amplificatore operazionale ha un certo numero di elementi passivi associati a sé, e richiede un'alimentazione per poter operare; tutte queste caratteristiche e informazioni non sono presenti nello schema a blocchi, che si limita a riportare la relazione matematica ingresso-uscita del modello descrittivo dell'amplificatore.

Esempio 2.2

La Figura 2.3 rappresenta la funzione derivata. Il derivatore può essere di natura meccanica, fluidica oppure elettronica, ma questa caratteristica non appare nel blocco.

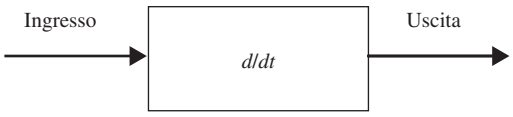


Figura 2.3 Funzione derivata per l'Esempio 2.2.

Esempio 2.3

Un potenziometro rotazionale è usato come trasduttore di posizione angolare; ha un intervallo di rotazione tra 0° e 300° ed è alimentato da una tensione di 12 V. Supponendo che il potenziometro sia lineare nell'intero campo operativo, trovare la sua funzione di trasferimento (si veda più avanti).

Soluzione

$$\begin{aligned}\text{FdT potenziometro} &= \frac{\text{tensione di uscita}}{\text{rotazione}} \\ &= \frac{12\ \text{V}}{300^\circ} = 0.04\ \text{V/gradi}\end{aligned}$$

La Figura 2.4 descrive la funzione del trasduttore.

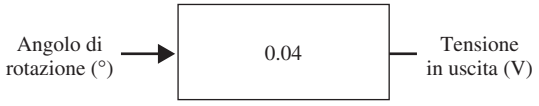


Figura 2.4 Potenziometro per l'Esempio 2.3.

2.2.1 Sommatore

Il sommatore (Figura 2.5) è il blocco usato per rappresentare la somma e/o la sottrazione di segnali. Viene rappresentato graficamente da un cerchio al quale arrivano e dal quale partono frecce indicanti i segnali entranti (con il segno positivo o negativo a indicare rispettivamente la somma o la sottrazione) e i segnali uscenti (senza segno). Il sommatore è detto anche *punto sommatore*, o nodo sommatore.

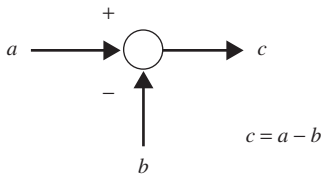


Figura 2.5 Rappresentazione del sommatore.

2.2.2 Punto di diramazione

Un punto di diramazione, o *separatore*, viene usato quando un segnale deve essere rediretto a due o più blocchi. Può essere visto come una giunzione elettrica dalla quale una certa tensione viene inviata a tutti i terminali connessi. La sua rappresentazione grafica è un pallino pieno da cui si diramano due o più frecce.

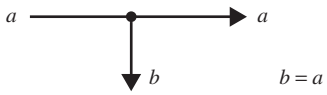


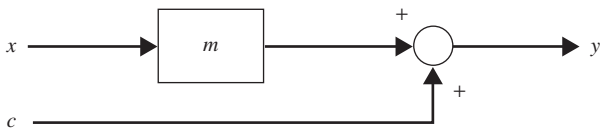
Figura 2.6 Rappresentazione del punto di diramazione.

2.3 Rappresentazione di un'equazione mediante schemi a blocchi

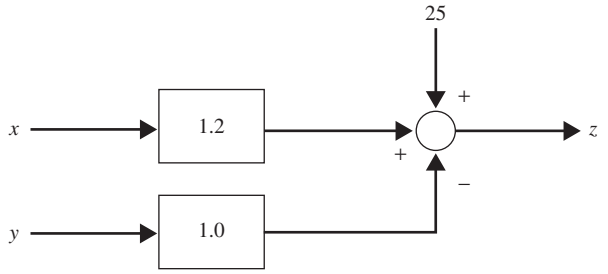
Le equazioni algebriche e le funzioni matematiche possono essere rappresentate in modo molto conveniente mediante schemi a blocchi.

Esempio 2.4

a. $y = mx + c$



b. $z = 1.2x - 10y + 25$



2.4 Rappresentazione di sistemi di controllo mediante schemi a blocchi

Un diagramma grafico a oggetti fornisce in genere informazioni sulle caratteristiche fisiche dei componenti impiegati in un processo, ma non sulle interazioni dei segnali di controllo. Ai fini dell'analisi di sistema, però, è necessario conoscere il modo in cui l'informazione di controllo viene trasferita da un componente a un altro. Una volta che i componenti sono sostituiti con blocchi equivalenti e questi ultimi sono connessi mediante linee di flusso del segnale, il diagramma a oggetti risulta sostituito da un equivalente schema a blocchi.

La Figura 2.7 mostra i componenti principali di un sistema di controllo di livello. Prima di poter trasformare la figura in uno schema a blocchi, si deve avere ovviamente un'idea del funzionamento del sistema e dell'interazione tra le sue parti; a tale scopo si possono porre le seguenti domande:

1. *Cosa viene controllato?* L'obiettivo di questo sistema di controllo è di mantenere (controllare) il livello di fluido (*variabile controllata*) in un serbatoio (*processo o impianto*) a un livello desiderato (*riferimento* o *set point*, SP).

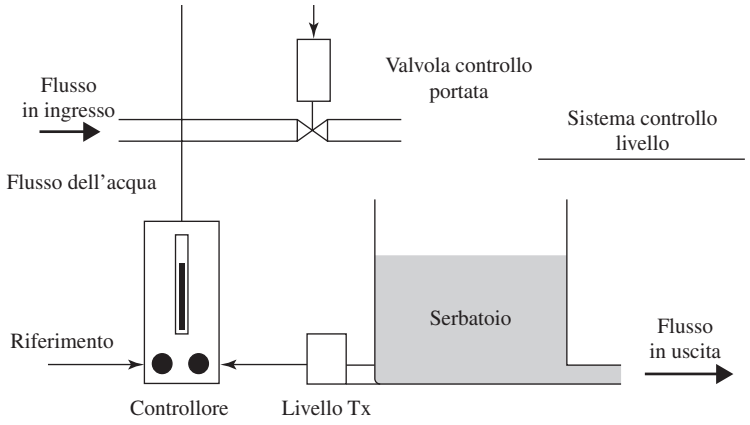


Figura 2.7 Sistema di controllo di livello.

2. *Come avviene il controllo?* Il livello del fluido nel serbatoio non può essere controllato direttamente. Esso può essere controllato solo indirettamente, variando (manipolando) il flusso di acqua (*variabile manipolata*, VM) nel serbatoio.

Funzionamento del sistema di controllo

- L'operatore fissa il valore desiderato del livello sul pannello di controllo (SP).
- Il trasduttore di livello fornisce un segnale proporzionale al valore effettivo del livello nel serbatoio (VM).
- La differenza tra SP e VM genera un segnale di errore (E = SP – VM).
- Se il segnale di errore è positivo, allora indica al controllore che il livello reale è inferiore al livello desiderato e viene generato un comando di attuazione che apre la valvola di controllo di flusso (*FCE* – elemento di controllo finale) permettendo un maggiore afflusso di liquido entro il serbatoio. In caso contrario, se il livello reale è maggiore di quello desiderato, l'apertura della valvola viene ridotta per abbassare la portata in ingresso.
- Se il sistema di controllo è stato tarato in modo appropriato, il livello dell'acqua raggiungerà il valore desiderato.

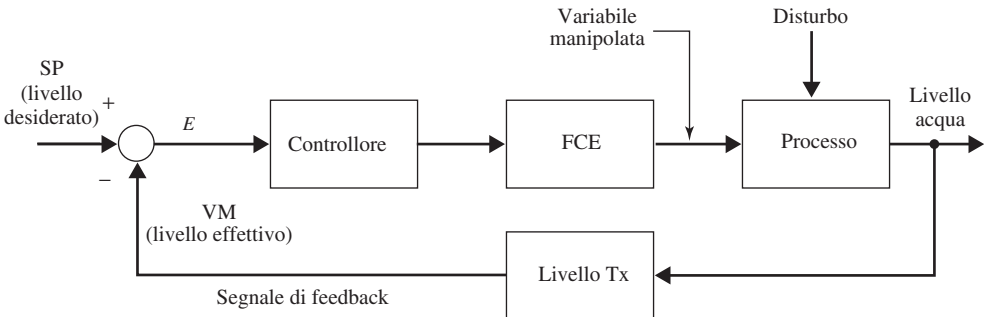


Figura 2.8 Schema a blocchi di un sistema di controllo di livello.

- Il ciclo di controllo continua a monitorare il livello del fluido; se tale livello cambia a causa di variazioni nella portata in uscita (che è controllata esternamente), il controllore provvederà ad alterare la portata stessa in modo da mantenere il livello costante.

Una volta che si è compreso chiaramente il funzionamento del sistema di controllo, si può passare alla corrispondente rappresentazione tramite schema a blocchi.

Esercizi

2.1 Identificare le varie componenti di un forno e tracciarne uno schema a blocchi.
2.2 Tracciare uno schema a blocchi per un sistema di riscaldamento domestico in anello chiuso.
2.3 Modificare lo schema a blocchi dell'Esercizio 2.2 per incorporare un metodo diverso di riscaldamento.

2.5 Funzioni di trasferimento

2.5.1 Generalità sulla funzione di trasferimento

La funzione di trasferimento (FdT) di un sistema (o di un blocco) è definita come il rapporto tra uscita e ingresso (Figura 2.9). La FdT viene espressa di solito nel dominio di Laplace (ovvero è la trasformata di Laplace della sua espressione matematica originale). Per sistemi elementari, privi di termini integrali e/o differenziali, la funzione di trasferimento è un valore numerico, come visto in precedenza.

$$\text{funzione di trasferimento} = \frac{\text{uscita}}{\text{ingresso}}$$

Figura 2.9 Funzione di trasferimento.

2.5.2 Funzione di trasferimento di un sistema in anello chiuso

I sistemi in ciclo chiuso (o retroazionati) si possono dividere in due categorie a seconda della natura del segnale di retroazione.

Sistema di controllo in anello chiuso a retroazione negativa La Figura 2.10 mostra una delle forme più semplici di sistema di controllo a retroazione negativa. Il sistema ha un blocco

nella linea di andata e uno in retroazione. In pratica, è possibile ridurre tutti i sistemi di controllo a questa struttura semplificata. Il blocco G rappresenta il guadagno di tutti i blocchi nella linea in avanti, mentre H rappresenta il guadagno di tutti i blocchi in feedback. Il nostro obiettivo è di ridurre ulteriormente la struttura fino ad arrivare a un unico blocco (come in Figura 2.11).

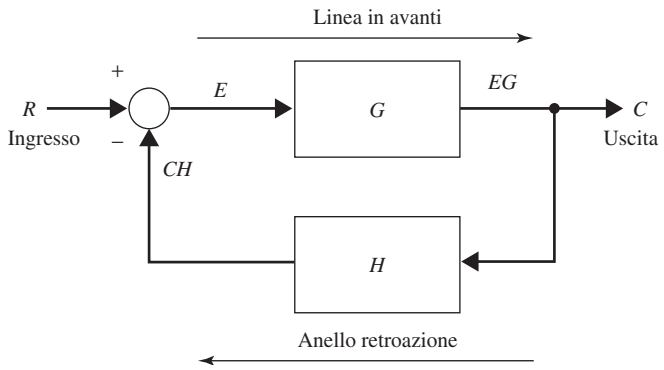


Figura 2.10 Sistema di controllo in ciclo chiuso a retroazione negativa.

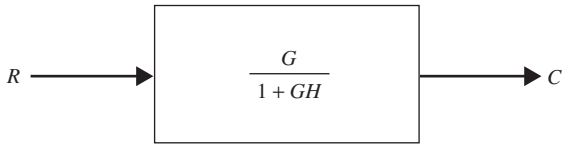


Figura 2.11 Forma ridotta di un sistema di controllo in anello chiuso.

Dallo schema a blocchi si possono ricavare le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}
\text{segnale retroaz.} &= \text{uscita} \times \text{guadagno retroaz.} = CH \\
\text{segnale errore } E &= \text{ingresso} - \text{segnale retroaz.} = R - CH \\
\text{segnale uscita } C &= \text{segnale errore} \times \text{guadagno in avanti} = EG
\end{aligned}$$

Sostituendo il segnale di errore ricavato dalla seconda nella terza, si ha

$$\begin{aligned}
\text{uscita } C &= (R - CH) \cdot G \\
C &= RG - CGH \\
C + CGH &= RG \\
C(1 + GH) &= RG \\
\frac{C}{R} &= \frac{G}{1 + GH}
\end{aligned}$$

$$\text{FdT anello chiuso} = \frac{\text{guadagno in avanti}}{1 + \text{guadagno in avanti} \times \text{guadagno in retroaz.}}$$

$$\text{uscita } C = \text{FdT anello chiuso} \times \text{ingresso } R$$

$$\text{FdT anello chiuso retroaz. neg. } \frac{C}{R} = \frac{G}{1+GH}$$

A questo punto si possono fare alcune considerazioni:

- la funzione di trasferimento del sistema di controllo è una proprietà del sistema;
- la funzione di trasferimento dipende unicamente dalla struttura interna e dai componenti del sistema;
- la funzione di trasferimento non dipende dall'ingresso applicato al sistema.

Quando si applica un ingresso a un sistema in ciclo chiuso, l'uscita che ne deriva dipende sia dall'ingresso sia dalla funzione di trasferimento del sistema in questione.

Sistema di controllo in anello chiuso a retroazione positiva La Figura 2.12 mostra un semplice sistema di controllo a retroazione positiva. Il sistema ha anche in questo caso un blocco nella linea di andata e uno in retroazione.

La funzione di trasferimento di ciclo chiuso può essere ottenuta in modo simile al caso precedente:

$$\text{FdT anello chiuso} = \frac{\text{guadagno in avanti}}{1 - \text{guadagno in avanti} \times \text{guadagno in retroaz.}}$$

$$\text{FdT anello chiuso } \frac{C}{R} = \frac{G}{1-GH}$$

$$\text{uscita } C = \text{FdT anello chiuso} \times \text{ingresso } R$$

$$\text{FdT anello chiuso retroaz. pos. } \frac{C}{R} = \frac{G}{1-GH}$$

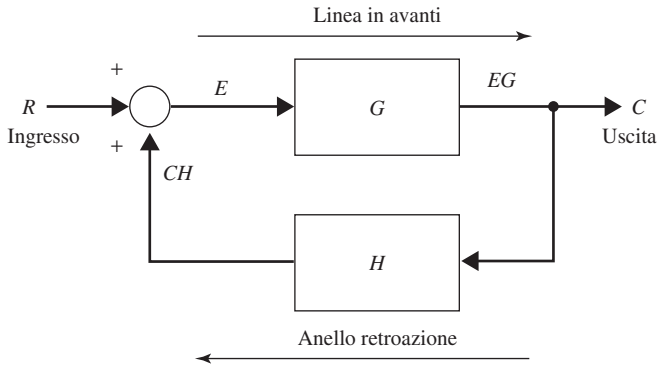


Figura 2.12 Sistema in anello chiuso a retroazione positiva.

2.5.3 Confronto tra sistemi a retroazione positiva e sistemi a retroazione negativa

Sistema in anello chiuso a retroazione negativa

- La funzione di trasferimento è generalmente minore di 1.
- La funzione di trasferimento ha un valore finito fintanto che il denominatore è maggiore di zero.
- È di uso comune nei sistemi di controllo.

Sistema in anello chiuso a retroazione positiva

- La funzione di trasferimento tende a diventare molto grande per GH (guadagno di anello) che tende a 1.
- Il suo uso è ristretto ad applicazioni particolari, come gli oscillatori.

Esempio 2.5

Determinare il guadagno totale di un sistema in ciclo chiuso a retroazione negativa avente guadagno in avanti pari a 10 e guadagno in retroazione pari a 2.

Soluzione

Sappiamo che $G = 10$ e $H = 2$. Il guadagno totale è lo stesso della funzione di trasferimento di anello chiuso. Per una retroazione negativa,

$$\text{FdT anello chiuso} = \frac{G}{1 + GH}$$

Sostituendo i valori di G e H nella formula si ottiene:

$$\text{FdT anello chiuso} = \frac{10}{1 + 10 \times 2} = 0.476$$

Nota: per brevità l'acronimo FdT indicherà nel seguito la funzione di trasferimento di un sistema anche se in anello chiuso.

Esempio 2.6

Un sistema in anello chiuso a retroazione negativa è soggetto a un ingresso di 5 V. Trovare la tensione in uscita sapendo che il guadagno in avanti e quello in retroazione valgono entrambi 1.

Soluzione

Poiché $G = H = 1$, ed essendo l'ingresso $R = 5$, si ha

$$\text{uscita } C = \text{funzione di trasferimento} \times \text{ingresso } R$$

La funzione di trasferimento è data da

$$\frac{C}{R} = \frac{G}{1+GH}$$

Sostituendo i valori di G e H si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{C}{R} &= \frac{1}{1+1\times 1} = 0.5 \\ C &= 0.5 \cdot R \\ &= 0.5 \times 5\ \text{V} = 2.5\ \text{V} \end{aligned}$$

Esempio 2.7

Ripetere l'Esempio 2.6 con i seguenti valori di guadagno in avanti:

a. $G = 2$
b. $G = 5$
c. $G = 10$
d. $G = 100$

Soluzione

$$\begin{aligned} \text{uscita } C &= \text{funzione di trasferimento} \times \text{ingresso } R \\ C &= \frac{G}{1+GH} \cdot R \end{aligned}$$

L'uscita si ottiene sostituendo i valori di G, H e R nella relazione precedente, quindi:

a. $G = 2$:

$$\begin{aligned} C &= \frac{2}{1+2\times 1} \times 5\ \text{V} \\ &= 3.333\ \text{V} \end{aligned}$$

b. $G = 5$:

$$\begin{aligned} C &= \frac{5}{1+5\times 1} \times 5\ \text{V} \\ &= 4.166\ \text{V} \end{aligned}$$

c. $G = 10$:

$$\begin{aligned} C &= \frac{0}{1+10\times 1} \times 5\ \text{V} \\ &= 4.545\ \text{V} \end{aligned}$$

d. $G = 100$:

$$\begin{aligned} C &= \frac{100}{1 + 100 \times 1} \times 5\ \mathrm{V} \\ &= 4.995\ \mathrm{V} \end{aligned}$$

Osservazione: aumentando il guadagno diretto, l'uscita tende al valore dell'ingresso senza però mai raggiungerlo.

Esempio 2.8

Determinare la funzione di trasferimento di un sistema in anello chiuso a retroazione positiva con guadagno in avanti uguale a 1 e guadagno in retroazione uguale a 0.5.

Soluzione
Si ha $G = 1$ e $H = 0.5$. La funzione di trasferimento di anello chiuso è data in questo caso da

$$\mathrm{FdT} = \frac{G}{1 - GH}$$

Sostituendo i valori numerici si ottiene:

$$\mathrm{FdT} = \frac{1}{1 - 1 \times 0.5} = 2.0$$

Esempio 2.9

Un sistema in anello chiuso a retroazione positiva è soggetto a un ingresso pari a 5 V. Trovare la tensione in uscita. Il sistema ha guadagno in avanti uguale a 1 e guadagno in retroazione pari a 0.5.

Soluzione
Poiché $G = 1$, $H = 0.5$, ed essendo l'ingresso $R = 5$, si ha

$$\begin{aligned} \text{uscita } C &= \text{funzione di trasferimento} \times \text{ingresso } R \\ C &= \frac{G}{1 - GH} \cdot R \end{aligned}$$

Sostituendo i valori numerici di G, H e R si ottiene:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{1 - 1 \times 0.5} \times 5\ \mathrm{V} \\ &= 10\ \mathrm{V} \end{aligned}$$

Esempio 2.10

Un sistema in anello chiuso a retroazione positiva è soggetto a un ingresso pari a 5 (unità). Determinare il valore della tensione di uscita per le seguenti coppie di guadagno (in avanti e in retroazione):

a. $G = 1$, $H = 0.75$
b. $G = 1$, $H = 0.9$
c. $G = 1$, $H = 0.99$
d. $G = 1.9$, $H = 0.5$
e. $G = 1.99$, $H = 0.5$
f. $G = 1.999$, $H = 0.5$

Soluzione

$$\begin{aligned} \text{uscita } C &= \text{funzione di trasferimento} \times \text{ingresso } R \\ C &= \frac{G}{1 - GH} \cdot R \end{aligned}$$

L'uscita si ottiene sostituendo i valori numerici di G, H e R nella precedente espressione.

a. $G = 1$, $H = 0.75$, $R = 5$ V:

$$\begin{aligned} C &= \frac{G}{1 - GH} \cdot R \\ &= \frac{1}{1 - 1 \times 0.75} \times 5 \text{ V} \\ &= 4 \times 5 \text{ V} = 20 \text{ V} \end{aligned}$$

b. $G = 1$, $H = 0.9$, $R = 5$ V:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{1 - 1 \times 0.9} \times 5 \text{ V} \\ &= 10 \times 5 \text{ V} = 50 \text{ V} \end{aligned}$$

c. $G = 1$, $H = 0.99$, $R = 5$ V:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{1 - 1 \times 0.99} \times 5 \text{ V} \\ &= 100 \times 5 \text{ V} = 500 \text{ V} \end{aligned}$$

d. $G = 1.9$, $H = 0.5$, $R = 5$ V:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1.9}{1 - 1.9 \times 0.5} \times 5 \text{ V} \\ &= 38 \times 5 \text{ V} = 190 \text{ V} \end{aligned}$$

e. $G = 1.99$, $H = 0.5$, $R = 5$ V:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1.99}{1 - 1.99 \times 0.5} \times 5 \text{ V} \\ &= 398 \times 5 \text{ V} = 1990 \text{ V} \end{aligned}$$

f. $G = 1.999$, $H = 0.5$, $R = 5$ V:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1.999}{1 - 1.999 \times 0.5} \times 5 \text{ V} \\ &= 3998 \times 5 \text{ V} = 19990 \text{ V} \end{aligned}$$

Osservazione: L'uscita tende all'infinito quando il guadagno di anello tende a 1 ($GH = 1$).

Esercizi

2.4. Un ingresso di valore 1.5 è applicato a un sistema in anello chiuso a retroazione negativa. Trovare la FdT sapendo che l'uscita vale 0.75.
2.5. Un segnale di ingresso di 1 V è applicato a un sistema in anello chiuso a retroazione positiva. Trovare la FdT sapendo che l'uscita vale 5.0 V.
2.6. Trovare il valore dell'errore E sapendo che $G = H = R = 1$ (Figura 2.13).

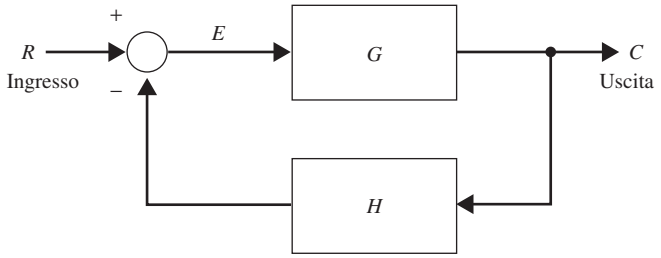


Figura 2.13 Schema per l'Esercizio 2.6.

2.6 Sistemi a retroazione unitaria

Se il guadagno in retroazione è unitario ($H = 1$), lo schema a blocchi del sistema di controllo in anello chiuso può essere ulteriormente semplificato (Figura 2.14).

In questo caso, il segnale di feedback che raggiunge il sommatore è lo stesso dell'uscita controllata; una grande quantità di tecniche di analisi e sintesi di sistemi di controllo è basata su questa struttura.

$$\text{FdT di un sistema a retroazione negativa} = \frac{G}{1 + GH}$$

Quando la retroazione è unitaria:

$$\mathrm{FdT} = \frac{G}{1+G}$$

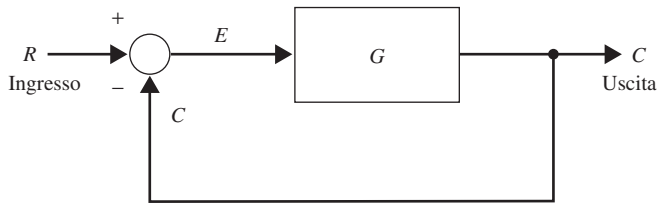


Figura 2.14 Sistema a retroazione unitaria.

2.6.1 Conversione in un sistema a retroazione unitaria

Qualsiasi tipo di sistema in anello chiuso può essere trasformato in uno equivalente a retroazione unitaria (Figura 2.15). La funzione di trasferimento di un sistema a retroazione negativa con guadagni G e H è data da:

$$\mathrm{FdT} = \frac{G}{1+GH}$$

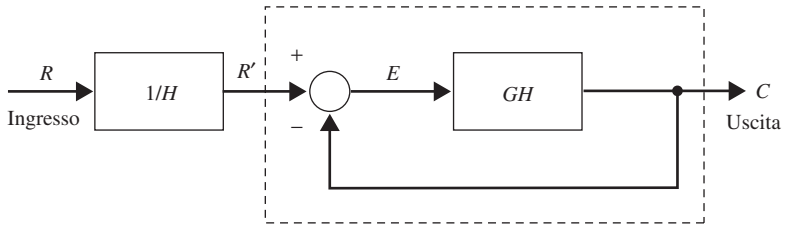


Figura 2.15 Sistema a retroazione unitaria equivalente.

Moltiplicando e dividendo per il guadagno in retroazione H si ottiene

$$\begin{aligned}\mathrm{FdT} &= \frac{1}{H}\frac{GH}{1+GH} \\ &= \frac{1}{H}\frac{G'}{1+G'}, \quad \text{dove} \quad G' = GH\end{aligned}$$

2.7 Riduzione dello schema a blocchi

Anche un semplice sistema in anello chiuso può contenere un numero elevato di blocchi e avere linee di andata e di retroazione multiple. È necessario in questo caso passare a una riduzione dello schema prima di poter calcolare la funzione di trasferimento complessiva del sistema. Di seguito vengono descritte alcune semplici regole per la riduzione e semplificazione degli schemi a blocchi.

1. **Blocchi in cascata:** Quando vi sono blocchi in serie, essi possono essere sostituiti con un unico blocco avente come FdT il prodotto delle singole FdT (Figura 2.16)

$$\text{guadagno tot. } G = \text{guad. } G_1 \times \text{guad. } G_2 \times \text{guad. } G_3 \times \cdots$$

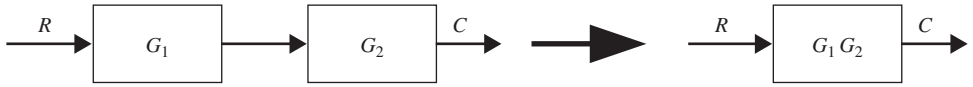


Figura 2.16 Blocchi in serie.

2. **Blocchi in parallelo (linea di andata):** Si veda la Figura 2.17.

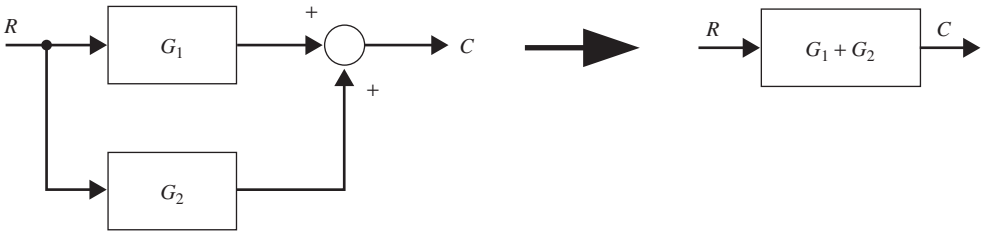


Figura 2.17 Blocchi in parallelo.

3. **Spostamento del sommatore davanti al blocco:** Si veda la Figura 2.18.

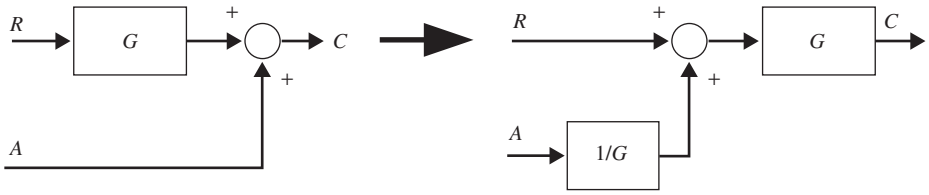


Figura 2.18 Spostamento del sommatore davanti al blocco.

4. **Spostamento del sommatore dietro al blocco:** Si veda la Figura 2.19.

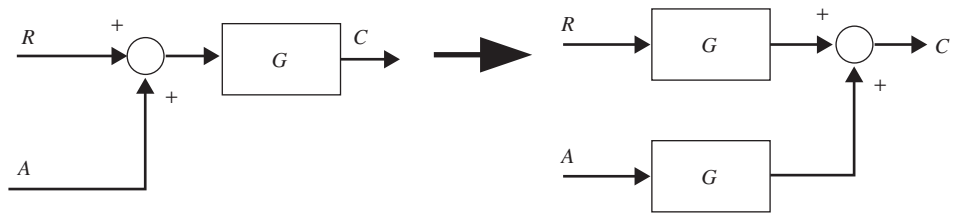


Figura 2.19 Spostamento del sommatore dietro al blocco.

5. Spostamento del separatore davanti al blocco: Si veda la Figura 2.20.

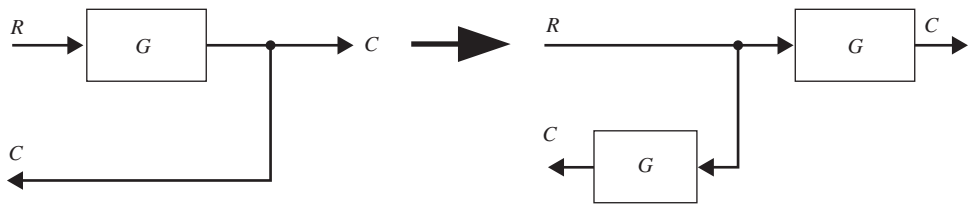


Figura 2.20 Spostamento del separatore davanti al blocco.

6. Spostamento del separatore dietro al blocco: Si veda la Figura 2.21.

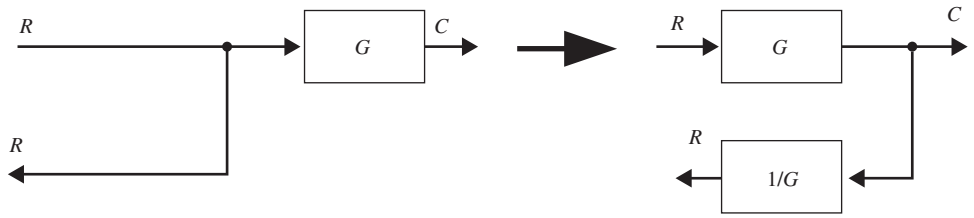


Figura 2.21 Spostamento del separatore dietro al blocco.

Esempio 2.11

Semplificare lo schema a blocchi di Figura 2.22 e determinare il valore di *C*.

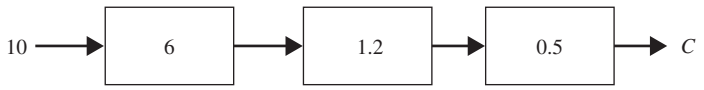


Figura 2.22 Schema a blocchi per l'Esempio 2.11.

Soluzione
Siccome tutti i blocchi sono in serie, possiamo applicare la regola 1.

$$\text{guadagno tot. } G = 6 \times 1.2 \times 0.5 = 3.6$$

Pertanto:

$$\begin{aligned} \text{uscita } C &= \text{guadagno tot.} \times \text{ingresso } R \\ &= 3.6 \times 10 = 36 \end{aligned}$$

Il risultato finale è mostrato in Figura 2.23.

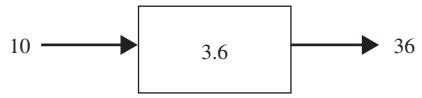


Figura 2.23 Blocco ridotto per l'Esempio 2.11.

Esempio 2.12

Trovare la funzione di trasferimento per lo schema a blocchi di Figura 2.24 e determinare il valore E dell'errore sapendo che $R = 2$, $G_1 = 2/3$ e $G_2 = 12$.

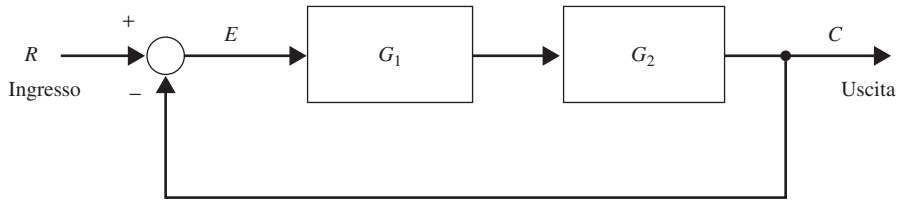


Figura 2.24 Schema a blocchi per l'Esempio 2.12.

Soluzione
I blocchi G_1 e G_2 sono in serie, quindi possono essere combinati in un singolo blocco.

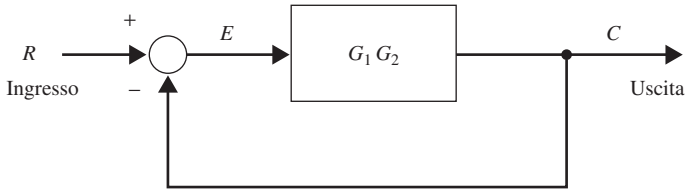


Figura 2.25 Schema ridotto per l'Esempio 2.12.

Il diagramma di Figura 2.25 rappresenta la riduzione del sistema in uno a retroazione unitaria; la sua funzione di trasferimento è data da

$$\mathrm{FdT} = \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2}$$

Sostituendo i valori di G_1 e G_2 si ha

$$\mathrm{FdT} = \frac{\frac{2}{3} \times 12}{1 + \frac{2}{3} \times 12} = 0.889$$

Essendo l'errore E = riferimento R – feedback VM e trattandosi di una retroazione unitaria, il valore del segnale di retroazione è lo stesso dell'uscita C.

$$\begin{aligned} \text{errore } E &= R - C \\ &= R - [\mathrm{FdT} \times R] \\ &= R(1 - \mathrm{FdT}) \\ &= 2(1 - 0.889) = 0.222 \end{aligned}$$

Esempio 2.13

Trovare la funzione di trasferimento dello schema a blocchi di Figura 2.26.

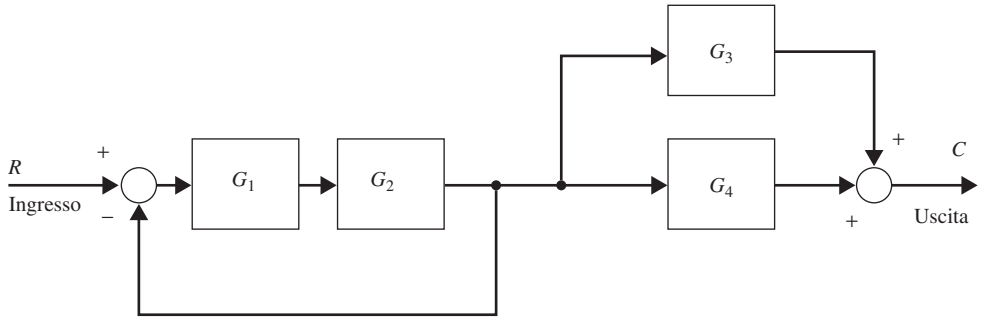


Figura 2.26 Schema per l'Esempio 2.13.

Soluzione

I blocchi G_1 e G_2 sono in serie e possono essere sostituiti da un blocco unico, con funzione di trasferimento $G_1 \cdot G_2$

I blocchi G_3 e G_4 sono in parallelo e possono essere sostituiti da un blocco unico, con funzione di trasferimento $G_3 + G_4$ (Figura 2.27).

Il blocco di retroazione unitaria si può adesso eliminare (Figura 2.28).

A questo punto, combinando i due blocchi in serie risultanti, si ottiene la funzione di trasferimento complessiva di Figura 2.29.

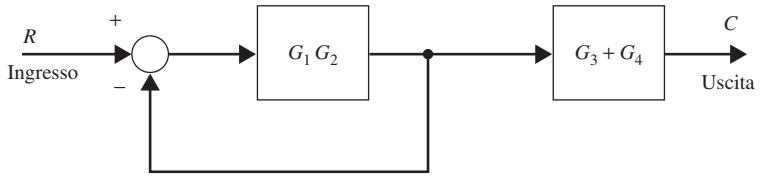


Figura 2.27 Primo stadio di riduzione per l'Esempio 2.13.

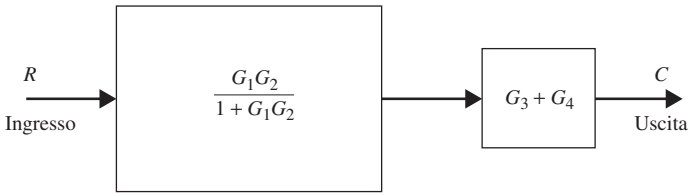


Figura 2.28 Secondo stadio di riduzione per l'Esempio 2.13.

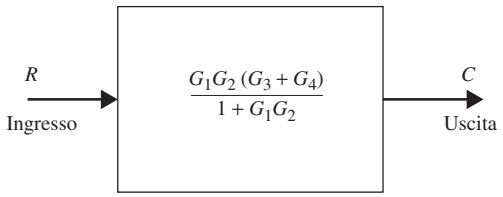


Figura 2.29 Schema finale per l'Esempio 2.13.

2.8 Simulazione di uno schema a blocchi mediante amplificatori operazionali

Per la simulazione analogica di sistemi di controllo possono essere usati gli amplificatori operazionali. Una volta che il circuito è costruito, il suo funzionamento può fornire importanti informazioni sulle caratteristiche operative del sistema di controllo che viene simulato. Un sistema di controllo in anello chiuso può venire rappresentato completamente mediante schema a blocchi; i blocchi costituenti lo schema sono di vario tipo, come blocchi guadagno, sommatori e separatori. Gli amplificatori operazionali (*op-amp*) possono venire usati per l'implementazione di ciascuna di queste funzioni. Si può quindi replicare uno schema a blocchi di un sistema in anello chiuso con una serie di op-amp collegati tra loro mediante linee rappresentative dei segnali di flusso.

2.8.1 Sommatore

La Figura 2.30 mostra l'implementazione di un sommatore mediante l'uso di op-amp. In uno schema a blocchi, il sommatore accetta due segnali di ingresso, SP (riferimento) e VM

(retroazione) e genera il segnale di errore E. L'op-amp viene configurato quindi come un amplificatore differenziale. L'uscita dell'amplificatore è data da:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_4}{R_2}V_2 - \frac{R_3}{R_1}V_1$$

dove:
- V_2 = segnale applicato all'ingresso non invertente
- V_1 = segnale applicato all'ingresso invertente

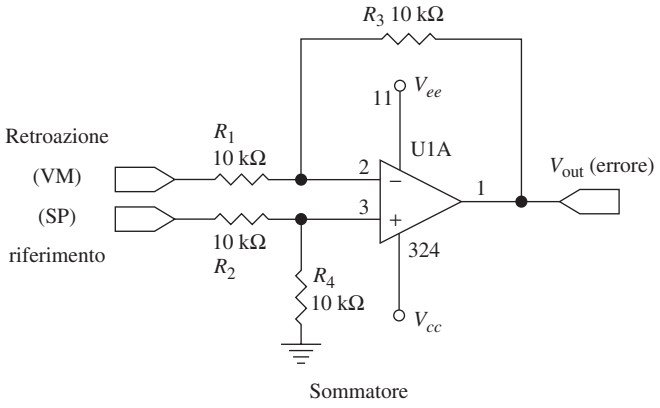


Figura 2.30 Circuito sommatore.

Le resistenze R_4 e R_2 stabiliscono il guadagno per l'ingresso V_2; se sono uguali, il guadagno V_2 è pari a 1. Analogamente, R_3 e R_1, che stabiliscono il guadagno per l'ingresso V_1, possono essere scelte uguali per avere guadagno unitario. Singole resistenze aventi tolleranze del 5% sono di uso comune e perfettamente adatte allo scopo. Per avere le migliori prestazioni si possono tenere presenti i seguenti punti:

- selezionare le resistenze nell'intervallo 10 kW÷100 kW;
- selezionare e combinare R_1 e R_2;
- selezionare e combinare R_3 e R_4;
- tarare le tensioni del circuito entro i limiti dell'intervallo di uscita dell'op-amp.

Se le quattro resistenze hanno gli stessi valori (10 kW, in questo caso), e cioè

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

l'equazione in uscita diviene:

$$V_{\text{out}} = V_2 - V_1$$

Se i segnali sono applicati in modo tale che

$$\begin{aligned} V_2 &= \text{SP (segnale di riferimento)} \\ V_1 &= \text{VM (segnale di retroazione)} \end{aligned}$$

la tensione di uscita è data da

$$V_{\text{out}} = \text{SP} - \text{VM}$$

il che è equivalente all'errore (E) in uno schema a blocchi (Figura 2.31).

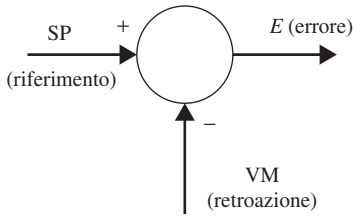


Figura 2.31 Sommatore equivalente.

La precedente equazione può quindi essere scritta come:

$$E(V_{\text{out}}) = \text{SP}(V_2) - \text{VM}(V_1)$$

2.8.2 Sommatore con ingresso SP regolabile

In applicazioni di laboratorio, si usa un potenziometro per ottenere un set point variabile come ingresso a un sistema di controllo in anello chiuso. Un'implementazione tipica è illustrata in Figura 2.32. Il diagramma, in effetti, è simile al caso in cui il potenziometro è assente. Tutte e quattro le resistenze R_1-R_4 vedono aumentato il proprio valore a 33 kW.

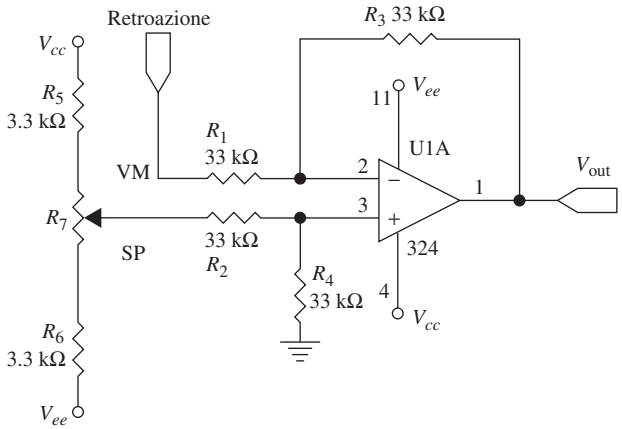


Figura 2.32 Sommatore con ingresso SP regolabile.

Queste resistenze dovrebbero essere in generale molto maggiori di quelle usate per la regolazione del riferimento SP (R_5, R_6 e R_7). Il potenziometro R_7 è quello che permette la regolazione del set point controllando la tensione di ingresso. La rete di set point (R_5, R_6 e R_7) è connessa attraverso un'alimentazione bipolare la quale permette l'applicazione di una tensione bipolare SP al circuito. Le resistenze R_5 e R_6 consentono di variare l'intervallo della tensione SP entro i valori di alimentazione bipolare, quindi una regolazione fine sul valore di riferimento. L'intervallo di tensione di set point può essere fissato mediante le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned}
\text{tens. min di SP} &= \left[\frac{R_6(V_{cc}-V_{ee})}{R_5+R_6+R_7}+V_{ee}\right] \\
\text{tens. max di SP} &= \left[V_{cc}-\frac{R_5(V_{cc}-V_{ee})}{R_5+R_6+R_7}\right]
\end{aligned}$$

Esempio 2.14

Con riferimento alla Figura 2.32, si assuma una tensione bipolare di alimentazione di ±15 V. Calcolare il valore del potenziometro R_7 in modo da avere una tensione di riferimento di ±1 V.

Soluzione
Essendo R_3 = 3.3 kW, R_6 = 3.3 kW, V_{cc} = +15 V, V_{ee} = –15 V ed essendo le tensioni minima e massima di riferimento pari a ±1 V, sostituendo i valori nell'espressione per il minimo di set point si ha:

$$\begin{aligned}
\text{tens. min di SP} &= \left[\frac{R_6(V_{cc}-V_{ee})}{R_5+R_6+R_7}+V_{ee}\right] \\
-1\ \text{V} &= \left[\frac{3.3\,\text{k}\Omega\,(15\ \text{V}-(-15\ \text{V}))}{3.3\,\text{k}\Omega+R_7+3.3\,\text{k}\Omega}+(-15\ \text{V})\right] \\
&= \left[\frac{3.3\,\text{k}\Omega\times 30\ \text{V}}{6.6\,\text{k}\Omega+R_7}-15\ \text{V}\right] \\
(1\ \text{V})(6.6\,\text{k}\Omega+R_7) &= (3.3\,\text{k}\Omega\times 30\ \text{V})-(15\ \text{V})(6.6\,\text{k}\Omega+R_7) \\
R_7 &= 0.471\,\text{k}\Omega
\end{aligned}$$

Verifica: Sostituendo il valore trovato per R_7 nell'espressione del massimo valore di set point si ha:

$$\begin{aligned}
\text{tens. max di SP} &= \left[V_{cc}-\frac{R_5(V_{cc}-V_{ee})}{R_5+R_6+R_7}\right] \\
&= \left[15\ \text{V}-\frac{3.3\,\text{k}\Omega\,(15\ \text{V}-(-15\ \text{V}))}{3.3\,\text{k}\Omega+0.471+3.3\,\text{k}\Omega}\right] \\
&= \left[15\ \text{V}-\frac{3.3\,\text{k}\Omega\times 30\ \text{V}}{7.071\,\text{k}\Omega}\right] \\
&= 0.9992\ \text{V}\quad \textbf{OK}
\end{aligned}$$

Il valore standard più vicino per un potenziometro è 500 W, e verrà usato tale valore. L'intervallo effettivo di set point per questo potenziometro è di ±1.056 V.

2.8.3 Blocco guadagno

La relazione ingresso-uscita di un elemento di controllo può essere espressa matematicamente mediante relazioni algebriche, differenziali e integrali. Uno schema a blocchi di un sistema di controllo può quindi contenere i seguenti blocchi base:

- blocco guadagno costante invertente;
- blocco guadagno costante non invertente;
- blocco guadagno derivativo;
- blocco guadagno integrale.

Lo sviluppo di circuiti rappresentanti blocchi integrali e derivativi verrà presentata più avanti; nel prosieguo di questo capitolo saranno descritti solamente i due blocchi guadagno costante (invertente oppure no).

2.8.4 Blocco guadagno costante (non invertente)

Un blocco a guadagno costante è essenzialmente un amplificatore con guadagno G (Figura 2.33). La relazione ingresso-uscita di tale blocco è data da:

$$C\ (\text{uscita}) = G\ (\text{guadagno}) \times R\ (\text{ingresso})$$

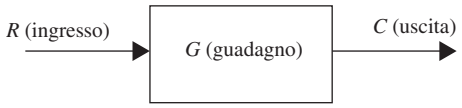


Figura 2.33 Blocco guadagno costante.

La rappresentazione di un blocco guadagno costante non invertente, mediante l'uso di un amplificatore operazionale, è data in Figura 2.34. Le resistenze R_1 e R_2 definiscono il guadagno G:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

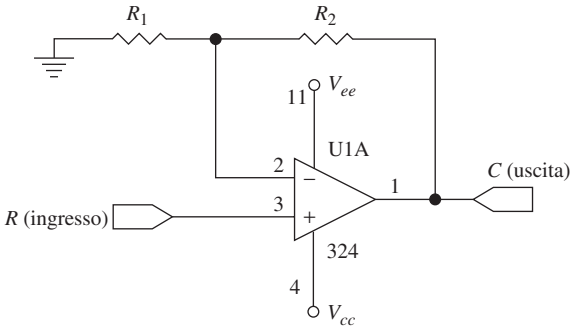


Figura 2.34 Blocco guadagno costante (non invertente).

Per applicazioni a guadagno costante, le resistenze R_1 e R_2 possono essere scelte tra un'ampia gamma di valori standard. Per applicazioni più critiche, o per quelle che possono richiedere una regolazione nel guadagno, la resistenza R_2 è sostituita in genere da un potenziometro.

Esempio 2.15

Costruire un circuito che rappresenti il blocco in Figura 2.35. Identificare l'intervallo dei segnali d'ingresso per il quale il circuito fornisce una rappresentazione accurata (reale).

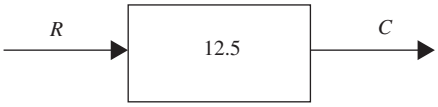


Figura 2.35 Schema per l'Esempio 2.15.

Soluzione
Il blocco in figura ha un guadagno costante (non invertente) che può essere rappresentato da un amplificatore operazionale con guadagno $G = 12.5$. Tale guadagno è dato da:

$$\begin{aligned} G &= 1 + \frac{R_2 \text{ (resistenza di retroazione)}}{R_1 \text{ (resistenza terminale invertente)}} \\ 12.5 &= 1 + \frac{R_2}{R_1} \\ \frac{R_2}{R_1} &= 11.5 \end{aligned}$$

Scegliendo $R_1 = 2.0$ kW:

$$R_2 = 11.5 \times 2.0\ \text{k}\Omega = 23\ \text{k}\Omega$$

Per quanto riguarda R_2, si può usare una resistenza di 23.2 kW con precisione 1%. La Figura 2.36 mostra il diagramma completo per l'implementazione di questo blocco guadagno.

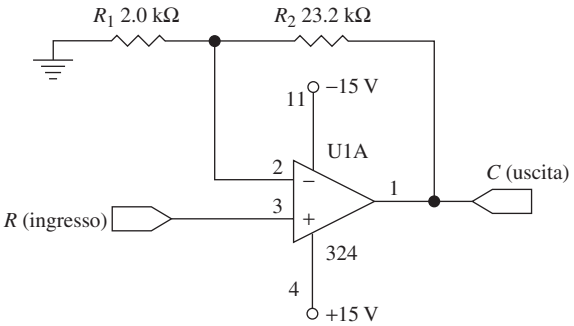


Figura 2.36 Op-amp per l'Esempio 2.15.

Massimo segnale di ingresso Un'elevata tensione di alimentazione produce ovviamente un maggiore intervallo per il segnale di ingresso. Si può usare un amplificatore operazionale LM324, il quale accetta un'alimentazione bipolare di ±15 V. Ci si può aspettare una perdita di saturazione da 1 a 1.5 V per l'LM324, per cui l'alimentazione ha un'oscillazione di ±13.5 V. Siccome la richiesta massima di guadagno è di 12.5, il massimo segnale di ingresso che può essere gestito da questo amplificatore è:

$$\begin{aligned}\text{oscillazione segnale ingresso} &= \frac{\text{intervallo di saturazione uscita}}{\text{guadagno amplificatore}} \\ &= \frac{\pm 13.5\ \text{V}}{12.5} = \pm 1.08\ \text{V}\end{aligned}$$

L'impiego di questo amplificatore è utile nei casi in cui il segnale di ingresso varia entro ±1.08 V.

2.8.5 Blocco guadagno costante (invertente)

La Figura 2.37 mostra una rappresentazione circuitale di un amplificatore operazionale a guadagno costante (invertente). Ora il segnale di ingresso è applicato al terminale invertente; il segnale di uscita viene invertito ed è sfasato di 180° rispetto all'ingresso. Le resistenze R_1 e R_2 definiscono il guadagno G dell'amplificatore:

$$G = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

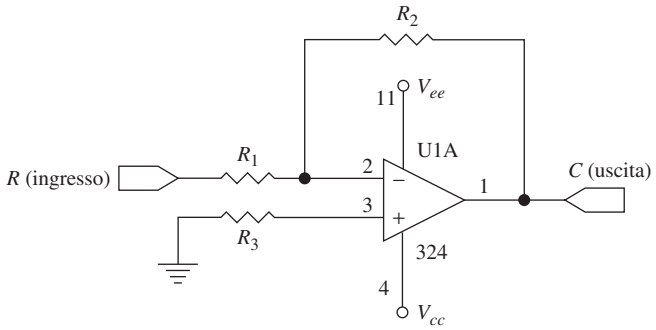


Figura 2.37 Blocco guadagno costante (invertente).

Per l'implementazione si raccomanda di porre una resistenza tra la terra e il terminale non invertente. Tale resistenza riduce gli errori di distorsione di corrente presenti nell'amplificatore. La resistenza R_3 viene scelta idealmente come la combinazione in parallelo di R_1 e R_2, ma se la resistenza di retroazione R_2 è molto maggiore di R_1 si può porre $R_3 = R_1$.

$$R_3 = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}\right)$$

Si possono scegliere valori standard per le resistenze R_1 e R_2 a guadagno fisso, oppure si può usare un potenziometro in retroazione per R_2 se è necessario un guadagno regolabile.

2.8.6 Punto di diramazione

Un punto di diramazione o separatore serve a trasmettere un segnale a più punti dello schema a blocchi. Usando la terminologia elettrica, tale comunicazione può essere implementata facilmente mediante l'interconnessione fra due punti. Può succedere a volte che le componenti circuitali si sovraccarichino a causa della bassa impedenza di ingresso della destinazione; per risolvere tale inconveniente, si ricorre all'uso di buffer a guadagno unitario che riducono il carico e mantengono l'integrità del segnale.

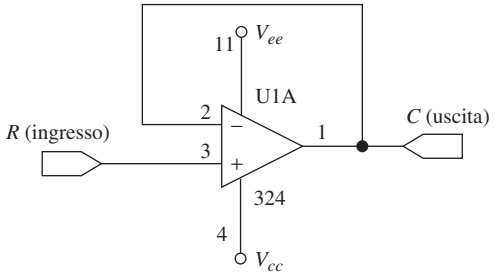


Figura 2.38 Buffer a guadagno unitario.

La Figura 2.38 mostra un buffer a guadagno unitario usato per isolare differenti sezioni di un circuito. Un segnale di ingresso è applicato al terminale non invertente e il terminale invertente viene collegato all'uscita. Il circuito può quindi essere considerato un amplificatore non invertente modificato, con una resistenza nulla in retroazione e una infinita tra il terminale invertente e la terra.

$$\text{guadagno amplificatore } G \quad = \quad 1 + \frac{0}{\infty} \quad = \quad 1$$

Con un guadagno unitario, l'uscita è della stessa ampiezza e polarità dell'ingresso. L'impedenza di ingresso di un amplificatore non invertente (quindi a buffer con guadagno unitario) è molto alta e questo riduce la quantità di potenza richiesta al circuito sorgente. Si deve però prestare attenzione, in quanto un amplificatore operazionale reale non opera con un guadagno esattamente pari a 1, e si possono introdurre nel circuito errori di offset, anche se piccoli.

2.8.7 Sommatore a più ingressi

L'amplificatore differenziale usato precedentemente per l'implementazione di un sommatore non si può usare nel caso di un sommatore a ingresso multiplo (Figura 2.39). In questo caso, si deve usare un amplificatore sommatore. L'implementazione per mezzo di un op-amp è descritta dalla Figura 2.40. Si tratta essenzialmente di un amplificatore invertente; ogni ingresso è collegato a un terminale invertente attraverso una resistenza di ingresso.

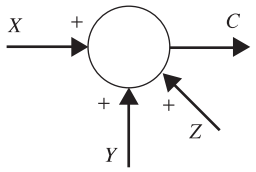


Figura 2.39 Sommatore a ingresso multiplo.

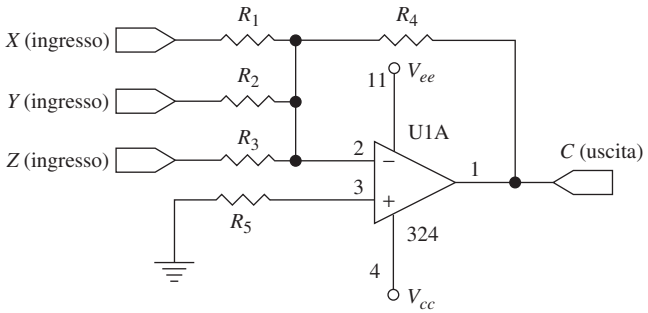


Figura 2.40 Configurazione di un sommatore a ingresso multiplo.

Si possono applicare all'amplificatore più ingressi. Il rapporto tra le resistenze di retroazione e di ingresso fornisce il guadagno per quel particolare segnale di ingresso:

$$\text{uscita } C = -\left(\frac{R_4}{R_1}X + \frac{R_4}{R_2}Y + \frac{R_4}{R_3}Z\right)$$

Se $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, l'espressione si semplifica in

$$\text{uscita } C = -(X + Y + Z)$$

Il segno di inversione può essere rimosso usando l'uscita come ingresso per un altro amplificatore invertente a guadagno unitario. L'implementazione completa è riportata in Figura 2.41.

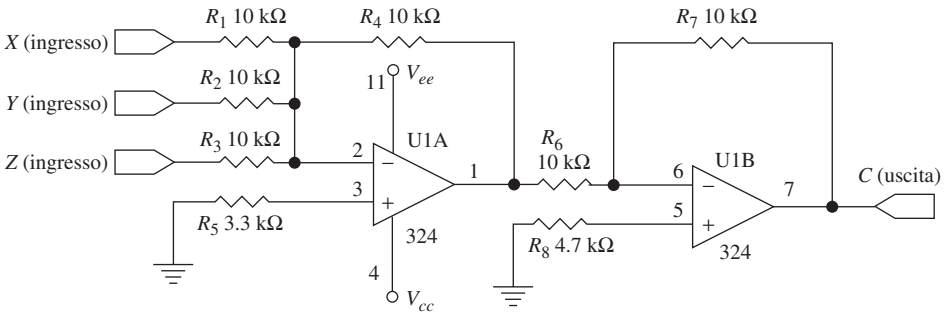


Figura 2.41 Implementazione completa: sommatore a ingresso multiplo.

Esempio 2.16

Costruire un circuito per implementare il diagramma di Figura 2.42.

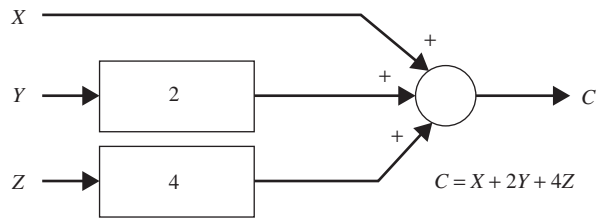


Figura 2.42 Diagramma per l'Esempio 2.16.

Soluzione

Lo schema a blocchi (Figura 2.42) rappresenta un sommatore a ingresso multiplo. L'ingresso X viene sommato senza amplificazione, mentre gli ingressi Y e Z sono soggetti, rispettivamente, a un guadagno di 2 e di 4.

Vi sono diversi modi per implementare il circuito; probabilmente il più semplice consiste nel fare riferimento alla configurazione di Figura 2.41, con una modifica. Il secondo amplificatore invertente cambia il segno al guadagno in valori positivi; le resistenze di ingresso R_1, R_2 e R_3 vengono scelte in modo da soddisfare le richieste di guadagno dei tre ingressi; pertanto, i valori dei guadagni saranno–1, –2 e –4 rispettivamente per i segnali X, Y e Z.

Usando una resistenza in retroazione di 10 kW, si possono calcolare i valori delle resistenze di ingresso:

R_1:

$$\begin{aligned} \text{guadagno} &= -\frac{R_4}{R_1} \\ -1 &= -\frac{10\,\text{k}\Omega}{R_1} \\ R_1 &= 10\,\text{k}\Omega \end{aligned}$$

R_2:

$$\begin{aligned} \text{guadagno} &= -\frac{R_4}{R_2} \\ -2 &= -\frac{10\,\text{k}\Omega}{R_2} \\ R_2 &= 5\,\text{k}\Omega \end{aligned}$$

R_3:

$$\begin{aligned} \text{guadagno} &= -\frac{R_4}{R_3} \\ -4 &= -\frac{10\ \text{k}\Omega}{R_3} \\ R_3 &= 2.5\ \text{k}\Omega \quad (\text{usare standard } 1\%\ 2.49\ \text{k}\Omega) \end{aligned}$$

La Figura 2.43 mostra l'implementazione dello schema a blocchi precedente.

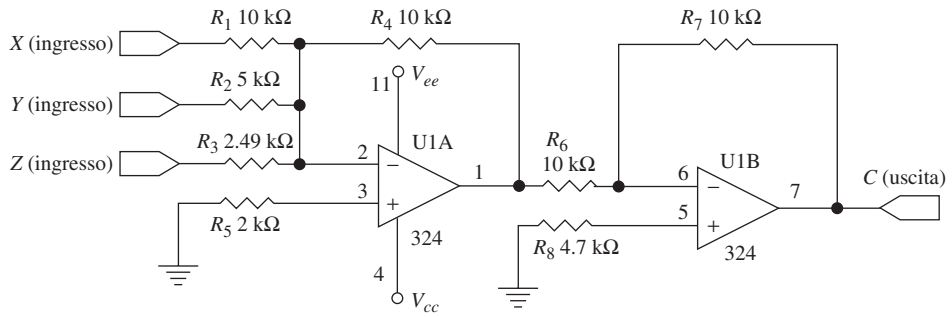


Figura 2.43 Diagramma per l'Esempio 2.16.

Esempio 2.17

Tracciare un diagramma schematico per rappresentare il sistema a retroazione unitaria, con guadagno in avanti uguale a 10, descritto in Figura 2.44.

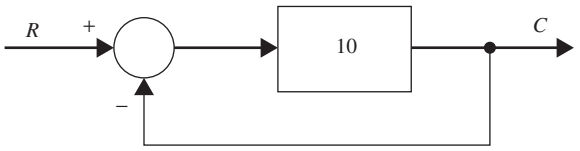


Figura 2.44 Diagramma per l'Esempio 2.17.

Soluzione
In figura, il set point non richiede aggiustamento; esso contiene due elementi principali: un blocco sommatore e un blocco guadagno (non invertente). L'implementazione completa è mostrata nello schema di Figura 2.45.

$$\begin{aligned} \text{guadagno blocco guadagno cost. (amp. U1B)} &= 1 + \frac{91\ \text{k}\Omega}{10\ \text{k}\Omega} \\ &= 10.1 \end{aligned}$$

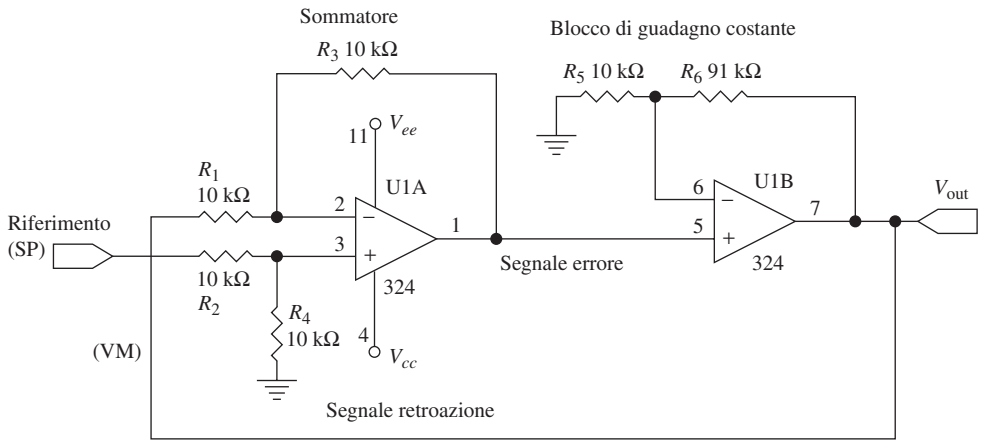


Figura 2.45 Schema circuitale per l'Esempio 2.17.

Nel caso si voglia una maggiore accuratezza, si può usare un potenziometro a 100 kW per la resistenza R_2 e un settaggio preciso del guadagno.

Esempio 2.18

Realizzare un circuito per simulare il comportamento di un sistema di controllo in anello chiuso descritto dallo schema a blocchi di Figura 2.46. Il circuito dovrà poi essere testato con i seguenti valori: tensione di ingresso compresa tra 0 e 2 V in cc; $G_1 = 2.5$, $G_2 = 2$ e $H = 1.25$.

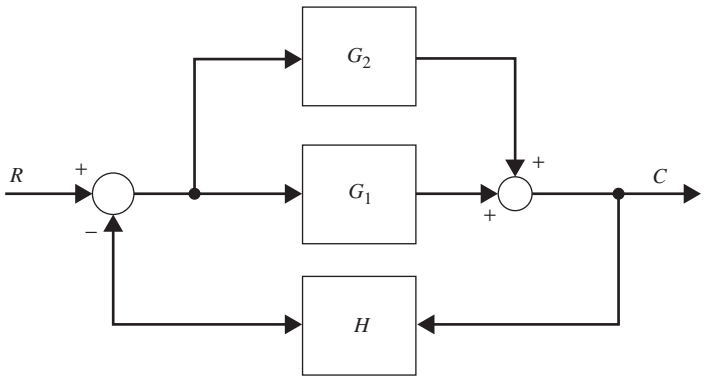


Figura 2.46 Schema a blocchi per l'Esempio 2.18.

Soluzione

I requisiti del circuito possono essere riassunti in:

- sommatore con ingresso SP;

- blocco guadagno non invertente G_1;
- blocco guadagno non invertente G_2;
- blocco guadagno H;
- secondo sommatore con due ingressi.

Le operazioni dei blocchi G_1 e G_2 possono abbinarsi al sommatore. L'amplificatore operazionale LM324 usato ha un'alimentazione bipolare a ±1.5 V ed è disponibile in un pacchetto DIP a basso costo contenente quattro amplificatori operazionali.

Sommatore con ingresso SP: La tensione di set point applicata varia tra 0 e 2 V senza passare da voltaggi negativi, cosicché il potenziometro di ingresso è collegato tra il morsetto positivo dell'alimentazione (+15 V) e la terra.

$$\begin{aligned} \text{tensione ingresso max} &= 2.0\ \text{V} \\ &= \frac{R_6}{R_5 + R_6} \times V_{cc} \end{aligned}$$

Pertanto:

$$\begin{aligned} 2.0\ \text{V} &= \frac{R_6}{3.3\ \text{k}\Omega + R_6} \times 15\ \text{V} \\ R_6 &= 0.5\ \text{k}\Omega \end{aligned}$$

Scegliamo un potenziometro standard (500 Ω). Si veda la Figura 2.47.

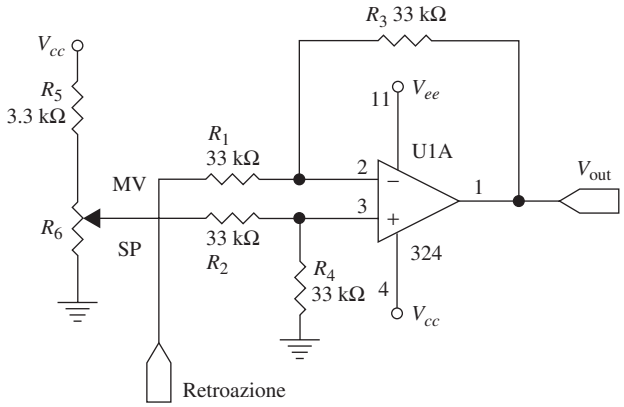


Figura 2.47 Circuito di implementazione del sommatore per l'Esempio 2.18.

***G_1, G_2* e secondo sommatore:** I dettagli sono mostrati in Figura 2.48. Le resistenze R_7 e R_9 definiscono il guadagno per il blocco G_1, mentre le resistenze R_8 e R_9 sono relative al blocco G_2. La tensione al terminale 7 è la somma algebrica delle tensioni G_1 e G_2 applicate al terminale invertente. L'amplificatore U1C a guadagno unitario inverte ulteriormente la polarità del segnale, permettendo il calcolo delle resistenze.

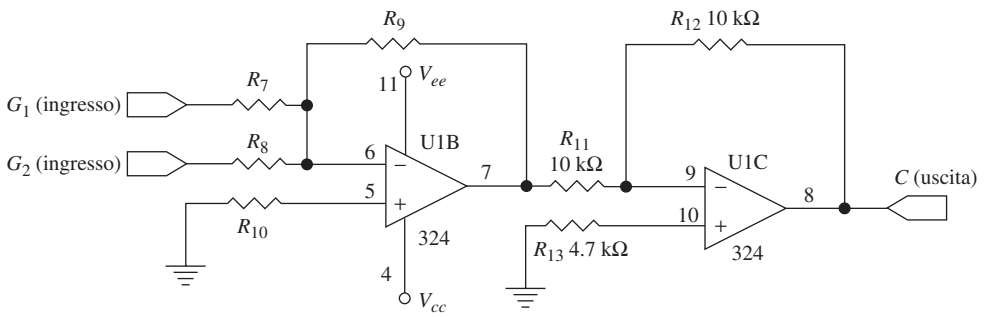


Figura 2.48 Blocchi G_1 e G_2 e secondo sommatore per l'Esempio 2.18.

Supponiamo di avere una resistenza di retroazione R_9 pari a 10 kΩ:

$$\begin{aligned} \text{guadagno } G_1 &= \frac{R_9}{R_7} \\ 2.5 &= \frac{10\ \text{k}\Omega}{R_7} \\ R_7 &= 4\ \text{k}\Omega \quad (\text{usare } 3.9\ \text{k}\Omega) \end{aligned}$$

In modo simile, si può calcolare la resistenza R_8 da

$$\begin{aligned} \text{guadagno } G_2 &= \frac{R_9}{R_8} \\ 2.0 &= \frac{10\ \text{k}\Omega}{R_8} \\ R_8 &= 5\ \text{k}\Omega \end{aligned}$$

Blocco guadagno *H*: I dettagli sono mostrati in Figura 2.49. Un amplificatore invertente funziona da blocco di retroazione con guadagno pari a 2. Se si sceglie R_{15} pari a 10 kΩ, si può calcolare R_{14}.

$$\begin{aligned} \text{guadagno} &= 1 + \frac{R_{15}}{R_{14}} \\ 2.25 &= 1 + \frac{10\ \text{k}\Omega}{R_{14}} \\ R_{14} &= 8\ \text{k}\Omega \quad (\text{usare } 7.9\ \text{k}\Omega) \end{aligned}$$

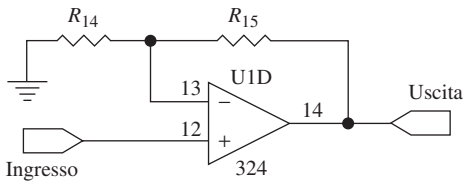


Figura 2.49 Circuito del blocco *H* per l'Esempio 2.18.

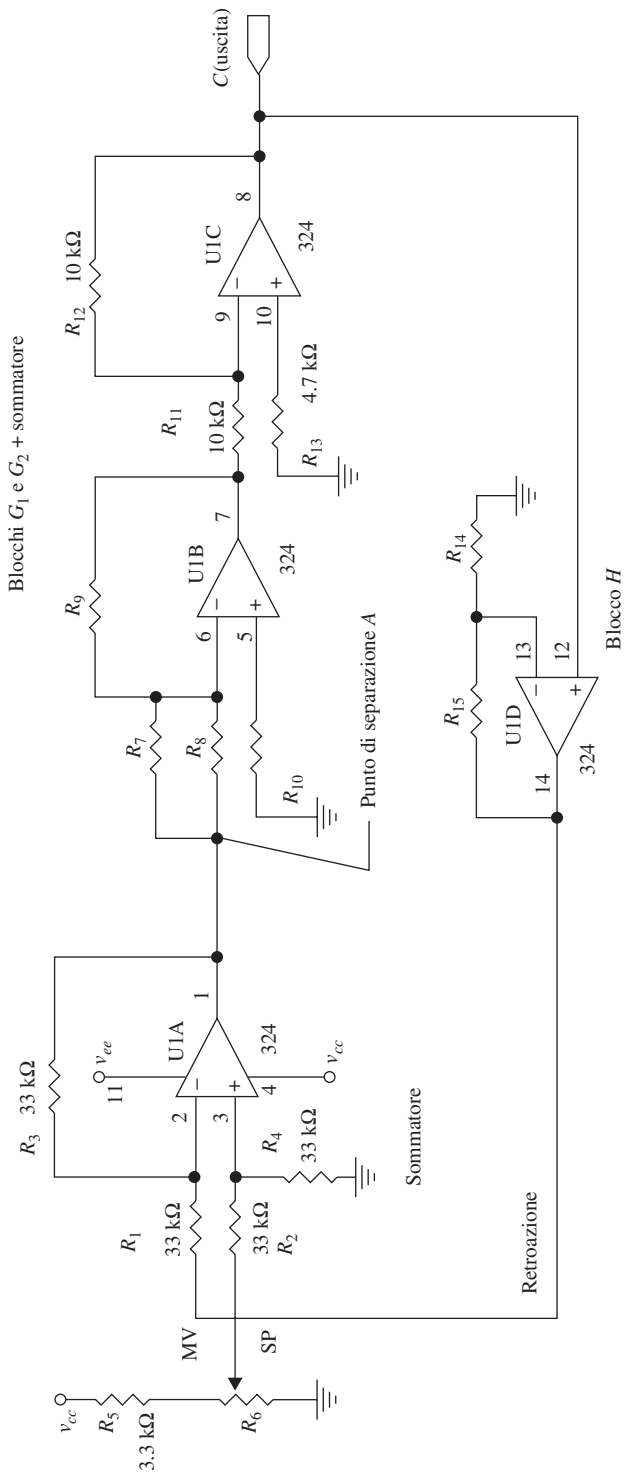


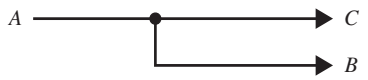
Figura 2.50 Schema completo per l'Esempio 2.18.

Avendo implementato tutte le funzioni del diagramma a blocchi, si può quindi tracciare lo schema completo di Figura 2.50.

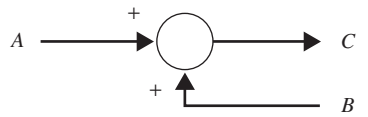
2.9 Problemi

1. Scrivere le equazioni che descrivono i seguenti schemi a blocchi.

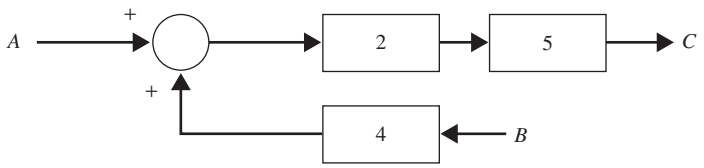
a.



b.



c.



2. Tracciare lo schema a blocchi che descrive le seguenti funzioni.
a. $Z = 2X + Y$
b. $C = 0.1A - 3$
c. $C = 10e + 2.5$ V

3. Dimostrare che la funzione di trasferimento FdT di un sistema di controllo in anello chiuso a retroazione negativa vale

$$\mathrm{FdT} = \frac{G}{1 + GH}$$

dove

$$\begin{aligned} G &= \text{guadagno in avanti} \\ H &= \text{guadagno in retroazione} \end{aligned}$$

4. Determinare la funzione di trasferimento di anello chiuso a retroazione negativa con guadagni in avanti e in retroazione rispettivamente uguali a 1 e 0.5.

5. Trovare l'espressione dell'errore in un sistema in anello chiuso in funzione dell'ingresso R, del guadagno in avanti G e del guadagno in retroazione H.

6. Modificare l'espressione dell'errore nel Problema 3 per un anello a retroazione unitaria.

7. Spiegare come l'errore viene influenzato da variazioni di:
a. guadagno in avanti G
b. guadagno in retroazione H
c. ingresso R

8. Quale effetto ha ciascuna delle seguenti voci sulla funzione di trasferimento?
a. ingresso R
b. guadagno in avanti G
c. guadagno in retroazione H

9. Un sistema in anello chiuso a retroazione positiva è soggetto a una tensione di ingresso di 1 V cc. Trovare la tensione di uscita sapendo che:

$$\begin{aligned} \text{guadagno in avanti} &= 1 \\ \text{guadagno in retroazione} &= 0.5 \end{aligned}$$

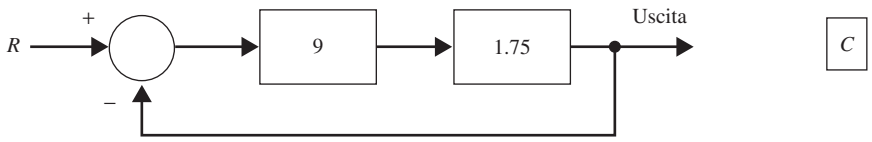
10. Stabilire quale delle seguenti affermazioni è vera.
a. La FdT di un sistema di controllo dipende dall'ingresso.
b. La FdT di un sistema di controllo dipende dall'uscita.
c. La FdT aumenta con l'aumentare dell'ingresso.
d. La FdT di un sistema di controllo non dipende dall'ingresso.
e. La FdT di un sistema di controllo dipende completamente dall'ingresso.

11. Un sistema in anello chiuso a retroazione negativa ha un ingresso di 5 V. Determinare l'uscita in volt, supponendo che il sistema abbia guadagno unitario in avanti e in retroazione.

12. Stabilire quale tra le seguenti affermazioni è corretta relativamente a un sistema in anello chiuso a retroazione unitaria.
a. All'aumentare del guadagno in avanti, l'uscita tende al valore dell'ingresso.
b. All'aumentare del guadagno in avanti, l'uscita diminuisce.
c. Il valore dell'uscita è sempre maggiore di quello dell'ingresso.
d. Il valore dell'uscita è indipendente dal guadagno in avanti.

13. Un ingresso di 1.5 è applicato a un sistema in anello chiuso a retroazione negativa. Trovare la funzione di trasferimento sapendo che l'uscita vale 0.75.

14. Qual è il valore dell'ingresso se l'uscita vale 1 V?



15. Tracciare uno schema circuitale per simulare lo schema a blocchi del Problema 14.

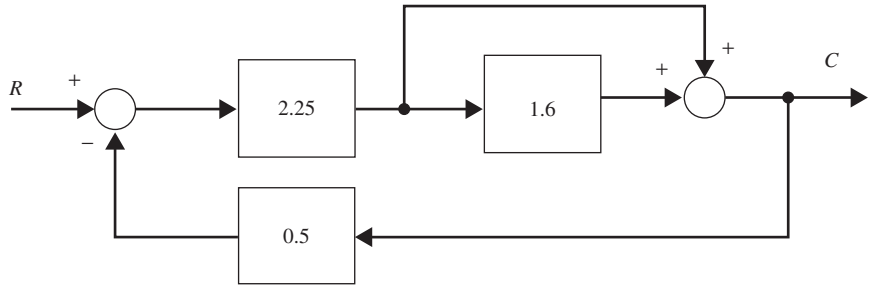
16. Applicare una tensione variabile in ingresso al circuito del Problema 15 e determinare l'ingresso quando il valore di uscita vale 1 V.

17. Sviluppare uno schema circuitale per simulare un sistema a retroazione negativa con guadagno in retroazione unitario e guadagno in avanti pari a 10. Supponendo di avere una alimentazione di ±15 V, qual è il massimo valore possibile del segnale di ingresso che permette il buon funzionamento del circuito?

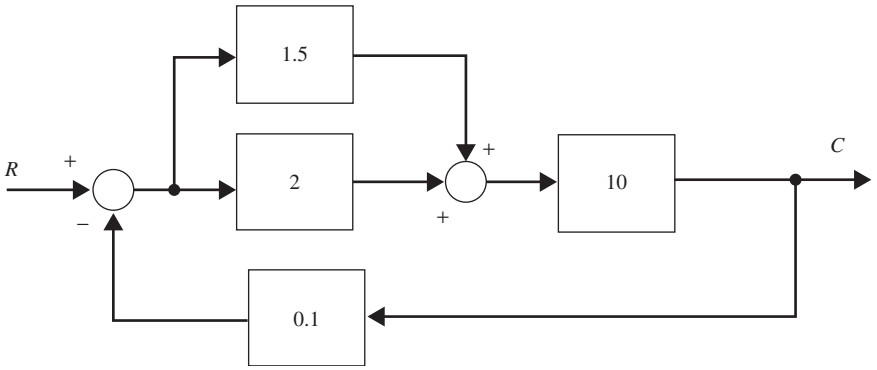
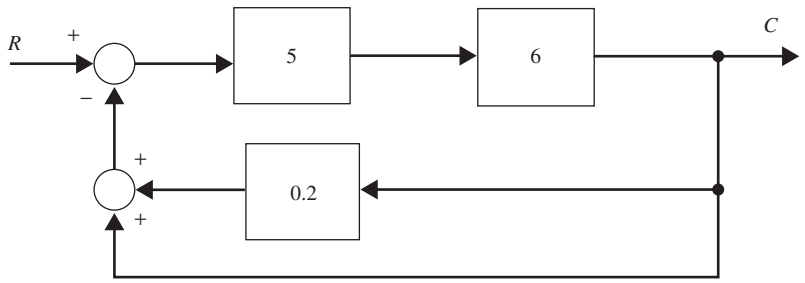
18. Sviluppare un circuito per simulare un sistema a retroazione positiva con guadagno in retroazione di 0.4 e guadagno in avanti uguale a 2.5.

19. Sviluppare uno schema per valutare le prestazioni del circuito del Problema 18.

20. Semplificare il diagramma a blocchi seguente e trovare la funzione di trasferimento complessiva.



21. Trovare la funzione di trasferimento del seguente sistema.



22. Semplificare il seguente schema a blocchi.